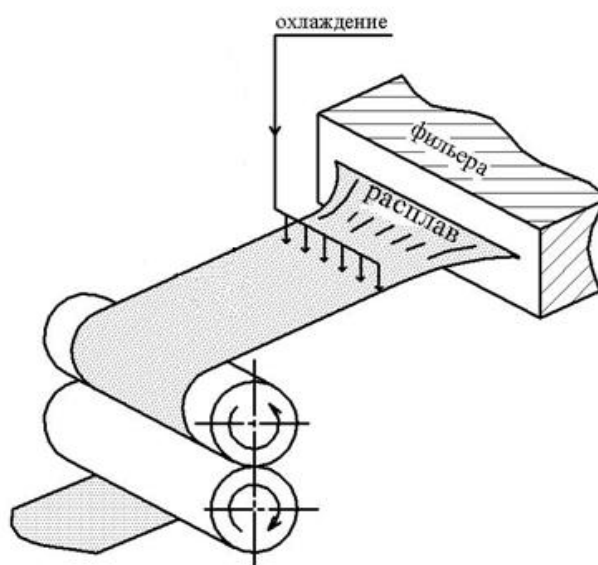




И.С. Курындин, А.В. Подшивалов

**РУКОВОДСТВО К ПРАКТИЧЕСКИМ И
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ
ПЛЕНOK И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**



**Санкт-Петербург
2025**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

И.С. Курындин, А.В. Подшивалов

**РУКОВОДСТВО К ПРАКТИЧЕСКИМ И
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ
ПЛЕНОК И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», «18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2025

Курындин И.С., Подшивалов А.В. Руководство к практическим и лабораторным работам по технологии получения пористых пленок и определению их характеристик. – СПб: Университет ИТМО, 2025. – 43 с.

Рецензент(ы):

Бронников Сергей Васильевич, главный научный сотрудник, профессор, доктор физико-математических наук Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» - Институт высокомолекулярных соединений

Учебно-методическое пособие будет полезно при выполнении лабораторных и практических занятий по дисциплине «Вторичная переработка материалов», а также для самостоятельного освоения курса. В нем содержатся сведения по технологии получения пористых пленок и методам определения характеристик пористой структуры. Данное пособие предназначено для магистров обучающимся по направлению подготовки 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», 18.04.02 - "Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии". Учебно-методическое пособие направлено на закрепление знаний и получение практических навыков по определению величин, используемых в исследовательских и производственных целях, для различных пористых систем.



Университет ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). Представлен в мировом ТОП-200 по телекоммуникационным технологиям (Telecommunication engineering), а также в ТОП-300 по нанонаукам и нанотехнологиям (Nanoscience & Nanotechnology) ARWU. Входит в ТОП-200 по инженерным наукам (Engineering and Technology), в ТОП-300 по физике и астрономии (Physics & Astronomy), наукам о материалах (Materials Sciences), а также по машиностроению, аэрокосмической и промышленной инженерии (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing Engineering) рейтинга QS. Лидер проекта «Приоритет – 2030».

© Университет ИТМО, 2025

© Курындин И.С., Подшивалов А.В. 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Введение	5
Требования к отчету по лабораторно-практическим работам	5
Лабораторно-практическая работа № 1. Технология получения пористых пленок	6
Лабораторно-практическая работа № 2. Плотность и общая пористость материалов	10
Лабораторно-практическая работа № 3. Деформационное поведение и механические свойства полимерных пленок	14
Лабораторно-практическая работа № 4. Определение проницаемости, числа и размеров пор микрофильтрационных мембран	17
Лабораторно-практическая работа № 5. Перколяционные переходы в полимерных пленках	24
Лабораторно-практическая работа № 6. Определение характеристик пористых систем методом термической десорбции азота	26
Приложение 1	30
Приложение 2	31
Приложение 3	34
Приложение 4	37
Приложение 5	39
Приложение 6	41

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЛПР – лабораторно-практическая работа

ТПА – термопластавтомат

ПЭ – полиэтилен

ПЭНД – полиэтилен низкого давления

ПП – полипропилен

ПВДФ – поливинилиденфторид

ПТР – показатель текучести расплава

Метод БЭТ – метод Брунауэра, Эммета и Теллера

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Вторичная переработка материалов» и выполняющих лабораторные или практические работы. Данное пособие может быть полезно обучающимся и специалистам в областях, связанных с материаловедением, экологией и научно-исследовательскими работами.

Пособие включает 6 лабораторно-практических работ (ЛПР). В каждой работе приводятся несколько вариантов ранее полученных экспериментальных данных, которые могут быть использованы на практических занятиях, при дистанционном обучении или самостоятельном изучении дисциплины студентами. Описание лабораторных работ содержит цель, описание объектов и методов исследования, теоретическую часть, задание, которое необходимо выполнить, и контрольные вопросы.

В пособии описаны требования к отчету по ЛПР и приводится образец оформления его титульного листа.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

Отчет по ЛПР должен содержать следующие блоки:

- Титульный лист (образец оформления титульного листа приведен в Приложении 1).
- Актуальность работы.
- Цель работы.
- Описание объектов исследования.
- Описание методов исследования.
- Полученные экспериментальные данные или исходные данные для своего варианта.
- Формулы, по которым проводятся расчеты.
- Пример расчета по формуле с подставленными числовыми значениями величин.
- Выводы или заключение.
- Ответы на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1 «ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ ПЛЕНОК»

Под вторичной переработкой полимерных отходов принято понимать их переработку через расплавы или растворы. Поскольку крупнотоннажные полимеры, такие как полиэтилен и полипропилен, относятся к классу нерастворимых полимеров, то изделия из них производят по технологиям, связанным с их переводом в вязкотекучее состояние (расплав). Для этого используют экструзионные линии и термопластавтоматы (ТПА). Экструзионные линии предназначены для получения изделий непрерывного профиля – стренг, листов, пленок, труб и т.д. С помощью ТПА получают штучные изделия, например, контейнеры, корпуса электроинструмента, фурнитуру и другие изделия.

Целью данной работы является получение плотных и пористых пленок при сложных деформационных и тепловых воздействиях, в основе которых лежит экструзия расплава полимера через плоскощелевую фильеру.

Для получения пленок используют гранулы полимеров промышленных марок: полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), поливинилиденфторида (ПВДФ). Их основные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики гранул полимеров

Поли- мер	Марка	Плотность, г/см ³	Молекуляр- ная масса, M _w , г/моль	ПТР*, г/10 мин	Темпера- тура плавления, °C
ПЭ	ПЭНД-276	0,95	170000	2.6-3.2	132
ПП	PPG 1035	0.90	380000	3.0-4.0	170
ПВДФ	Купар-720	1.78	190000	5.0-26.5	168

* Примечание. ПТР – показатель текучести расплава.

Процесс получения пористых пленок, известный как «melt stretching», включает пять последовательных стадий. Условия (параметры) проведения стадий являются предметом исследований цикла работ данного учебно-методического пособия и могут варьироваться в широких пределах.

Порядок выполнения работы

Стадия 1. Экструзия расплава полимера через плоскощелевую фильеру в условиях приложения к расплаву растягивающих усилий (Рис. 1). Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации экструзионной линии Scamia (Франция). После включения электропитания экструзионной линии следует дождаться выхода температур зон материального цилиндра и фильеры до заданных (~ 2 часа). По заданию преподавателя установить скорость вращения шнека и скорость приема пленки. Кнопкой «Пуск» начать процесс экструзии пленки. Кнопкой «Стоп» закончить процесс экструзии. Отключить электропитание экструзионной линии. Полученные образцы в дальнейшем будем называть «экструдированная пленка».



Рисунок 1 – Экструзия расплава полимера через плоскощелевую фильеру и прием пленки на валковое устройство

Стадия 2. Термообработка (отжиг) экструдированных пленок при температурах, близких к температуре плавления полимера. Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации для сушильного шкафа SNOL 60/350 (Varta, Латвия). На этой стадии образец экструдированной пленки в виде рулона или отдельного отрезка помещается в сушильный и выдерживается ~ 1 час при повышенной температуре. Значение температуры отжига устанавливается по заданию преподавателя. Полученные образцы после этой стадии в дальнейшем будем называть «отожженные пленки».

Стадия 3. Растяжение отоженных пленок при комнатной температуре. Именно на этой стадии происходит процесс порообразования. Стадия 3

может проводиться как в непрерывном технологическом режиме на валковом устройстве, так и путем растяжения отдельного отрезка пленки на разрывной машине (Рис. 2). Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации Разрывной машины 2166 Р5 (Точприбор, Иваново). По заданию преподавателя требуется установить скорости вращения валков или ход траверсы, которые обеспечат требуемую степень растяжения пленки.



Рисунок 2 – Растяжение отрезка отоженной пленки на разрывной машине

Стадия 4. Растяжение пленок при повышенной температуре. Стадия 4 может быть опущена и сразу выполнена Стадия 5. Стадия 4 проводится аналогично Стадии 3 с дополнительным использованием сушильных шкафов, которые будут поддерживать необходимую температуру растяжения. Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации Сушильного шкафа SNOL 60/350 (Varta, Латвия) и с инструкцией по эксплуатации Разрывной машины 2166 Р5 (Точприбор, Иваново). По заданию преподавателя устанавливаются температура в сушильном шкафу, скорости вращения валков или ход траверсы, которые обеспечат требуемую степень растяжения пленки.

Стадия 5. Термообработка (термофиксация) полученной пористой структуры. Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации Сушильного шкафа SNOL 60/350 (Varta, Латвия). На этой стадии образец пористой пленки в виде рулона или отдельного отрезка помещается в сушильный и выдерживается ~ 1 час при повышенной температуре. Значение температуры фиксации

устанавливается по заданию преподавателя. Полученные образцы после этой стадии (Рис. 3) в дальнейшем будем называть «пористые пленки».



Рисунок 3 – Пористая пленка, полученная в непрерывном технологическом режиме

Полученные образцы плотных и пористых пленок являются объектами исследований в следующих Лабораторно-практических работах.

После ознакомления с ЛПР № 1 и ответа на контрольные вопросы для случаев расчетно-практических работ или самостоятельного изучения дисциплины она считается выполненной.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой экструдер?
2. По какому параметру экструдера можно судить о его типоразмере?
3. Химические формулы ПЭ, ПП и ПВДФ.
4. Что такое молекулярная масса полимера?
5. Что такое полидисперность?
6. Как измеряется ПТР?
7. Как измеряется температура плавления полимеров?

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

«ПЛОТНОСТЬ И ОБЩАЯ ПОРИСТОСТЬ МАТЕРИАЛОВ»

Актуальность определения величин плотностей материалов и их общей пористости связана с тем, что методы разделения отходов часто основаны на их различной плотности; пористые материалы применяются в качестве адсорбентов загрязняющих веществ, а также величины плотностей и общей пористости позволяют рассчитывать необходимое количество сырья при планировании производства требуемого объема готовой продукции.

Целью работы является определение (расчет) следующих характеристик:

- плотности гранул полимеров как сырья для получения пленок;
- плотности пленок, полученных методом экструзии расплава;
- общей пористости и поверхностной плотности образцов;
- количества сырья, необходимого для производства 1 м² пористой пленки.

Объекты исследования

Гранулы, экструдированные и пористые пленки, описание которых приводится в Лабораторно-практической работе № 1.

Методы исследования

Для определения плотности гранул (как частиц неправильной формы) применяют метод, основанный на измерении объема вытесняемой жидкости. Жидкость должна удовлетворять следующим условиям:

- 1) хорошо смачивать поверхность полимера,
- 2) иметь плотность меньше, чем полимер.

Для гранул ПЭ и ПП этим требованиям удовлетворяет этанол, который имеет плотность 0,789 г/см³.

Определение массы отобранных гранул выполняют с помощью аналитических весов "ГосМетр ВЛ-210" (Рис. 4) с точностью измерения 0,1 мг.

Объем отобранной навески (V) находят с помощью мензурки по объему вытесняемой жидкости, который в свою очередь определяется по разности уровней жидкостей в мензурке до помещения навески образца (V_н) и после (V_к):

$$V = V_k - V_n \quad (1)$$

Расчет плотности гранул проводится по формуле:

$$\rho = m/V , \quad (2)$$

где ρ – плотность гранул,
 m – масса гранул,
 V – объем вытесняемой жидкости.



Рисунок 4 – Аналитические весы

Расчет среднего значения величины плотности ($\bar{\rho}$) проводят по формуле:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{n} , \quad (3)$$

где n – количество экспериментальных измерений.

Для нахождения разброса значений допускается использование среднеквадратического отклонения, которое находят по формуле:

$$\Delta\rho = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n - 1}} . \quad (4)$$

Для определения плотности экструдированной или пористой пленки вырезают кусок правильной геометрической формы (например, прямоугольник), измеряют его размеры и взвешивают на аналитических весах

Измерение толщины пленки (δ) проводят с помощью цифрового

микрометра "Vogel 0-50x0.001" (Германия) с точностью 1 мкм (Рис. 5). Значение толщины определяют по нескольким точкам и рассчитывают ее среднее значение и разброс:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} , \quad (5)$$

$$\Delta\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n - 1}} . \quad (6)$$

Плотность образца рассчитывается как отношение его массы к объему.



Рисунок 5 – Цифровой микрометр

Величина общей пористости пленок характеризует долю объема образца, занятую всеми типами пор (поверхностными, замкнутыми и сквозными). Общую пористость образцов определяют гравиметрическим методом и рассчитывают по формуле:

$$P = [(\rho - \rho_{\text{п}}) / \rho] \cdot 100 \% , \quad (7)$$

где ρ – плотность плотной пленки,
 $\rho_{\text{п}}$ – плотность пористой пленки.

Величина поверхностной плотности позволяет рассчитать, сколько пористой пленки можно получить из 1 кг полимера. Она определяется по формуле:

$$\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{п}} \cdot \delta , \quad (8)$$

где ρ_c – поверхностная плотность,
 ρ_n – плотность пористой пленки,
 δ – толщина пленки.

Задание (порядок выполнения работы)

1. Определить среднее значение плотности гранул и разброс ее значений. Найденные величины привести в кг/м^3 .
2. Определить среднее значение плотности экструдированных пленок и разброс ее значений. Найденные величины привести в кг/м^3 .
3. Определить среднее значение плотности пористых пленок и разброс ее значений. Найденные величины привести в кг/м^3 .
4. Рассчитать, используя среднее значение плотностей экструдированной и пористой пленок, величину общей пористости.
5. Рассчитать, используя средние значения толщины и плотности пористой пленки, значение поверхностной плотности пористых пленок. Найденную величину привести в г/м^2 .
6. Найти площадь пористой пленки, которую можно получить из 1 кг гранул полимера, делая допущение об отсутствии отходов. Найденную величину привести в г/м^2 .
7. В выводах к работе провести сравнение плотностей гранул и экструдированных пленок между собой и с плотностью гранул, которые приводит производитель. А также привести значения характеристик (плотности гранул и экструдированных пленок, поверхностной плотности пористых пленок и их общей пористости), упоминаемых в цели работы.

Для выполнения расчетно-практических работ или самостоятельного изучения дисциплины предложено 3 варианта экспериментальных данных (Приложение 2).

Контрольные вопросы

1. Что такое плотность? В каких единицах она измеряется?
2. Гранулы ПЭ и ПП были случайно перемешаны. Как их можно разделить?
3. Какие полимеры не тонут в воде?
4. Что такое гигроскопичность?
5. Какая масса у листа бумаги формата А4, если его поверхностная плотность составляет 80 г/м^2 ?

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

«ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК»

Для конструкционных и упаковочных материалов важное значение имеют механические характеристики. Пленки из вторичных материалов по свойствам могут отличаться от исходного (первичного) сырья. В связи с этим актуальной задачей является исследование деформационного поведения и определение механических характеристик образцов.

Для ориентированных аморфно-кристаллических полимеров типичным является следующее деформационное поведение при растяжении:

- На первом прямолинейном участке кривой напряжение–деформация наблюдается упругая деформация.
- Затем происходит переход через предел текучести, возникает так называемая «шейка», и на кривой возникает характерный максимум напряжений – зуб текучести.
- Дальнейшее растяжение сопровождается пластическими (необратимыми) деформациями.
- Дальнейший рост напряжения с увеличением деформации обусловлен деформацией шейки, в области которой материал имеет ориентированную структуру.
- Деформирование образца завершается его разрывом (разрушением).

Целью работы является анализ деформационного поведения и определение механических характеристик образцов пленок: модуля упругости, предела текучести, разрывной прочности, относительной деформации при разрыве и удельной работы деформации при разрыве.

Объекты исследования

Экструдированные пленки, описание которых приводится в ЛПР №1.

Методы исследования

Измерение толщины пленок проводится с помощью цифрового микрометра "Vogel 0-50x0.001" (Германия) с точностью 1 мкм (см. ЛПР №2, рис. 5).

Деформационное поведение пленок исследуют с использованием разрывной машины 2166 P5 (Точприбор, Россия). Образец перед началом испытаний закрепляют в зажимах тисочного типа (Рис. 6).

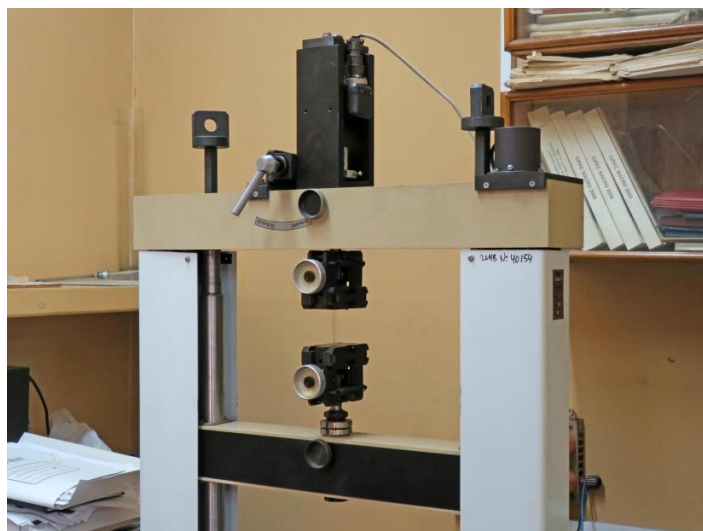


Рисунок 6 – Фотография образца в зажимах тисочного типа на Разрывной машине 2166 P5

Образцы с размерами 50×5 мм растягивают со скоростью 50 мм/мин. По записанным кривым усилие–перемещение (Рис. 7) по формулам (9)–(14) рассчитывают следующие характеристики:

- модуль упругости (E),
- предел текучести (σ_T),
- предел прочности (σ_p),
- относительное удлинение при разрыве (ϵ_p),
- работу деформации при разрушении (A) и
- удельную работу деформации при разрушении (ω).

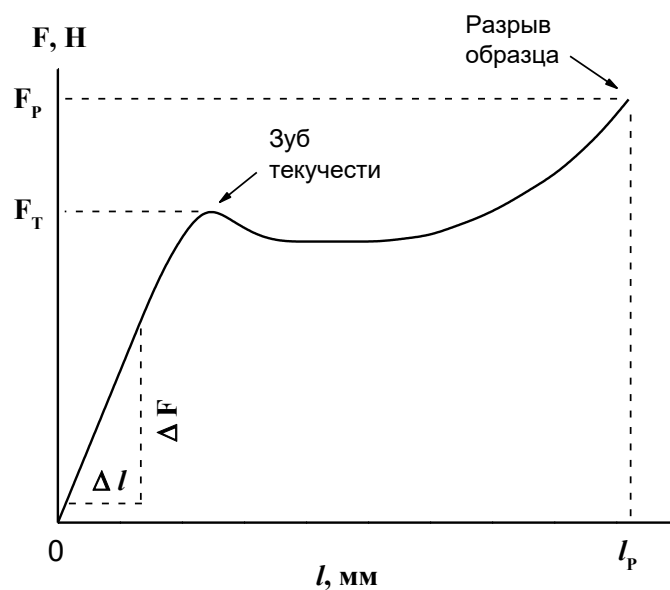


Рисунок 7 – Экспериментальная кривая усилие–перемещение и ее характерные точки

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta l} \times \frac{l_H}{S} = \frac{\Delta F}{\Delta l} \times \frac{l_H}{B\delta} , \quad (9)$$

$$\sigma_T = \frac{F_T}{S} = \frac{F_T}{B\delta} , \quad (10)$$

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S} = \frac{F_p}{B\delta} , \quad (11)$$

$$\varepsilon_p = \frac{l_p}{l_H} \times 100\% , \quad (12)$$

$$A = \int_0^{l_p} F(l)dl \approx \sum F(l)\Delta l = F_1\Delta l + F_2\Delta l + F_3\Delta l \dots , \quad (13)$$

$$\omega = \frac{A}{l_H S} . \quad (14)$$

В формулах (9)–(14):

l_H – начальная длина образца,

B – ширина образца,

δ – толщина образца,

S – площадь поперечного сечения образца,

F_T – усилие, при котором наблюдается зуб текучести,

F_p – усилие, при котором наблюдается разрушение образца,

l_p – перемещение, при котором наблюдается разрушение образца,

A – работа деформации при разрушении образца (она соответствует площади под кривой усилие – перемещение).

Затем кривую усилие (F , Н) – перемещение (l , мм) пересчитывают в кривую напряжение (σ , МПа) – деформация (ε , %), принимая во внимание следующее:

$$\sigma = F / S = F / (B \cdot \delta) , \quad (15)$$

$$\varepsilon = l / l_H \cdot 100 \% , \quad (16)$$

где l – текущее перемещение траверсы,

F – усилие, соответствующее текущему перемещению траверсы.

Примечание. Удельная работа деформации при разрушении образца соответствует площади под кривой напряжение–деформация.

Задание (порядок выполнения работы)

- Дать описание кривой напряжение-деформация.
- Рассчитать модуль упругости (E). Найденную величину привести в МПа.
- Рассчитать предел текучести (σ_T). Найденную величину привести в МПа.
- Рассчитать предел прочности (σ_p). Найденную величину привести в МПа.
- Рассчитать относительное удлинение при разрыве (ϵ_p). Найденную величину привести в %.
- Рассчитать работу деформации при разрушении. Найденную величину привести в Дж.
- Рассчитать удельную работу деформации при разрушении. Найденную величину привести в МДж/м³.
- Построить кривую напряжение (σ , МПа) – деформация (ϵ , %).
- В выводах к работе привести значения характеристик, упоминаемых в цели работы.

Для выполнения расчетно-практических работ или самостоятельного изучения дисциплины предложено 3 варианта экспериментальных данных (Приложение 3).

Контрольные вопросы

1. Что такое модуль упругости?
2. Что такое прочность (предел прочности)?
3. По какому критерию производится классификация полимеров на пластмассы и резины?
4. Какие полимеры находятся в высокоэластичном состоянии при комнатной температуре? Примеры полимеров.
5. Почему целесообразно криогенное измельчение полимеров?

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ, ЧИСЛА И РАЗМЕРОВ ПОР МИКРОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН»

Процессы очистки жидких сред занимают важное место при утилизации отходов и побочных продуктов предприятий. Для отделения нерастворенных частиц широко используются микрофильтрационные мембраны (пористые пленки). Основными свойствами мембран являются проницаемость (производительность), число и размеры пор. Определение этих характеристик актуально как с научной точки зрения (при разработки

новых мембран), так и с практической – при контроле качества готовой продукции.

Целью работы является определение (расчет) следующих характеристик:
– проницаемости (производительности) пористых пленок для этанола;
– числа и размера пор (распределения пор по размерам).

Объекты исследования

Пористые пленки, описание которых приводится в ЛПР № 1.

Методы исследования

Определение проницаемости пористых пленок по скорости протекания этанола

Определение производительности (проницаемости) пористых пленок для жидкостей проводится с помощью фильтрационной ячейки (рис. 8). Результаты, полученные этим методом, характеризуют только сквозные каналы.

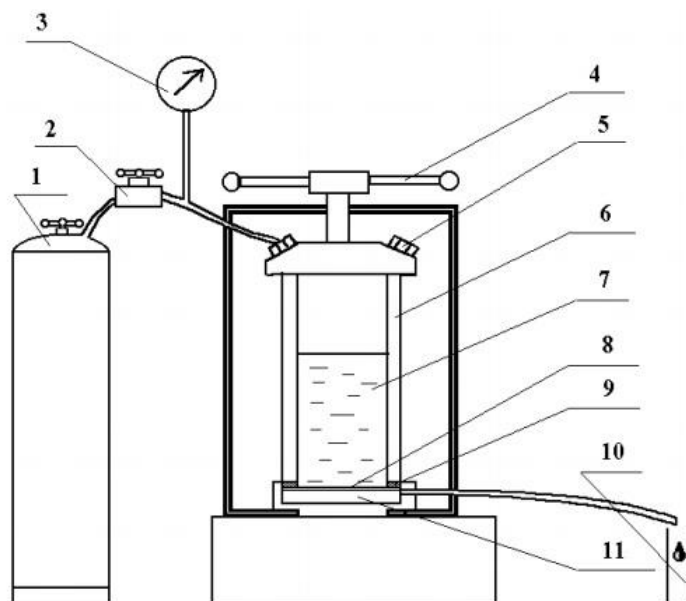


Рисунок 8 – Схема фильтрационной ячейки: 1 – баллон со сжатым азотом; 2 – редуктор; 3 – манометр; 4 – зажим; 5 – штуцер; 6 – корпус; 7 – жидкость; 8 – образец пористой пленки; 9 – резиновая прокладка; 10 – мензурка; 11 – пористая подложка

Для измерения проницаемости смачивающая полимер жидкость пропускается под давлением через пористую пленку. Для полиэтилена и полипропилена такой жидкостью является этанол. Протекание

смачивающих жидкостей происходит через каналы всех размеров независимо от давления, и поток жидкости линейно увеличивается с давлением. Источником давления служит баллон со сжатым азотом. Значение проницаемости рассчитывается по формуле:

$$G = V / (S \cdot \tau \cdot p \cdot K), \quad (17)$$

где G – проницаемость,

V – объем жидкости, протекающий через пористую пленку площадью S за время τ под действием давления p ,

K – коэффициент сопротивления фильтрационной ячейки потоку жидкости, $K = 0.2$.

Площадь пористого образца рассчитывается по формуле:

$$S = \pi r^2, \quad (18)$$

где S – площадь пористого образца,

r – радиус образца.

В данной работе измеряют время, в течение которого проходит определенный объем этанола ($V = 1$ мл) через образец диаметром 2 см под действием давления $p = 5$ атм.

Расчет среднего значения проницаемости G и разброс ее значений ΔG проводят по формулам:

$$\bar{G} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n}, \quad (19)$$

$$\Delta G = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}{n - 1}}, \quad (20)$$

Определение числа и размеров сквозных каналов

Метод фильтрационной порометрии применяется для определения числа и размеров сквозных каналов. Необходимым условием для реализации этого метода является использование жидкости, несмачивающей материал, из которого получен пористый образец. Несмачивающая жидкость первоначально, когда все каналы сухие, образует мениск на входе в каждый канал; приложение давления ниже некоторого минимального значения $p_{\min}$ не приводит к возникновению потока через пористую пленку (рис. 8). При увеличении давления до значения $p_{\min}$ каналы наибольшего размера $d_{\max}$ становятся проницаемыми

для несмачивающей жидкости. По мере увеличения давления все более мелкие каналы становятся проницаемыми. Протекание жидкости через каналы всех размеров наступает при достижении давления $p_{\max}$, и дальнейшее увеличение давления приводит только к увеличению потока J , пропорциональному увеличению давления (касательная линия, выходящая из начала координат, см. рис. 9).

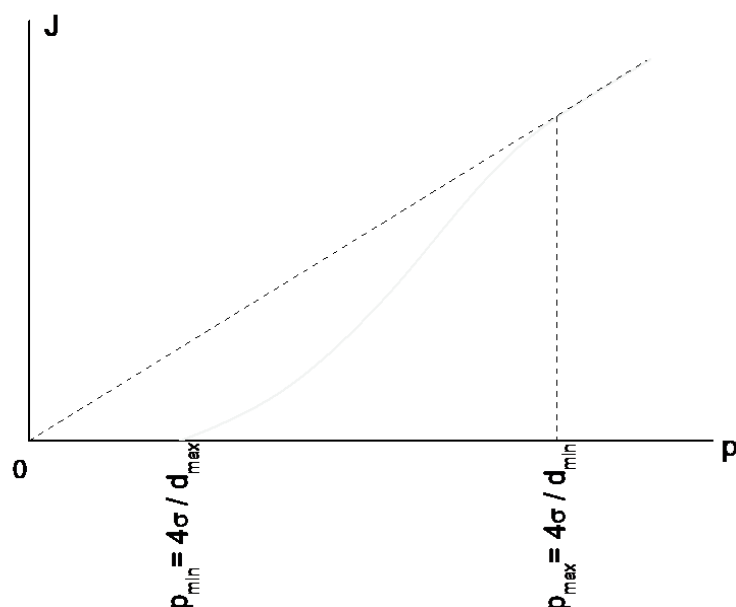


Рисунок 9 – Схематическое представление зависимости скорости потока жидкости от давления.

Если принять допущение, что каналы имеют форму цилиндров, расположенных перпендикулярно поверхности пленки, то размер каналов, проницаемых для несмачивающей жидкости, связан с давлением соотношением:

$$d = 4\sigma / p, \quad (21)$$

где d – размер (диаметр) канала,
 σ – поверхностное натяжение жидкости,
 p – давление.

Смачивающими жидкостями для ПЭ и ПП являются жидкости с поверхностным натяжением $\sigma_n < 3.2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$. Использование воды с $\sigma = 7.2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$ в качестве несмачивающей жидкости потребует приложения слишком больших давлений для ее продавливания через каналы, приводящих к деформации пористой структуры. Чтобы начало протекания жидкости через пористую пленку имело место при возможно меньших давлениях, необходимо использование жидкости с поверхностным натяжением, незначительно превышающим значение σ_n . В связи с этим в

качестве несмачивающей жидкости была выбрана смесь спонтанно смачивающей жидкости (этанола) и несмачивающей (воды), в которой концентрация этанола составляла 30 об.%, и она имела поверхностное натяжение $3.3 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Экспериментальное получение зависимости потока жидкости от давления проводится следующим образом. При медленном повышении давления определяется точка появления потока жидкости $p_{\min}$. Далее измеряется поток жидкости по мере увеличения давления. Скорость потока жидкости (Q) рассчитывают по формуле (17) и приводят в единицах Си – $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$. Используя соотношение (21) рассчитывают размер каналов, соответствующий давлению, при котором измеряли Q .

Для определения числа и размеров сквозных каналов используют графический метод обработки зависимости скорости потока жидкости от размера сквозных каналов (Рис. 10). Для этого производят разбивку абсциссы на одинаковые отрезки по размерам каналов. Шаг разбивки выбираем равным 40 нм. Далее для каждого интервала размеров сквозных каналов определяют приращение скорости потока жидкости ΔQ , как показано на рис. 10.

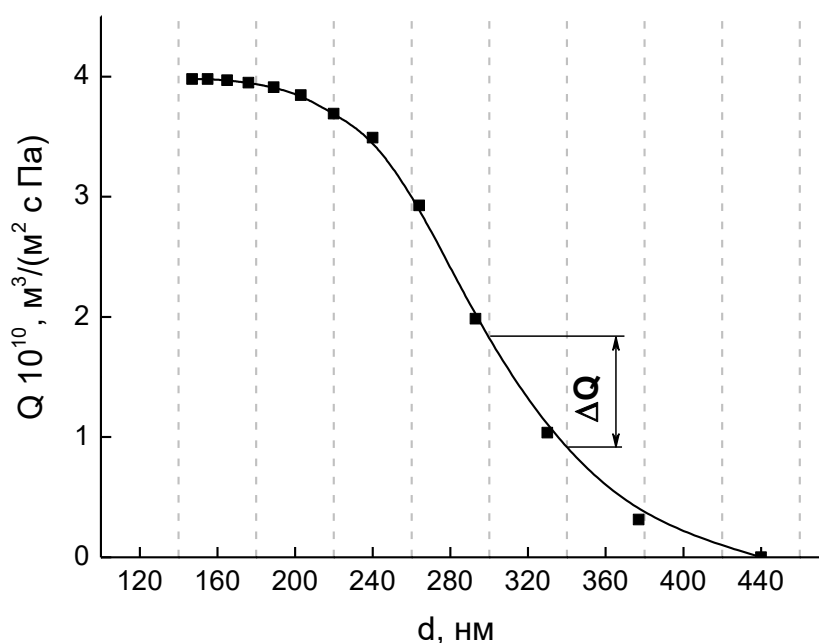


Рисунок 10 – Зависимость скорости потока жидкости от размера пор

Число сквозных каналов данного интервала размеров рассчитывается по формуле, в которую значения параметров подставляются в единицах СИ:

$$\Delta n_{i,i+1} = 128 \cdot \Delta Q_{i,i+1} \cdot \delta \cdot \eta / (\pi \cdot d^4), \quad (22)$$

где $\Delta n_{i,i+1}$ – число сквозных каналов с размерами от d_i до d_{i+1} ,
 $\Delta Q_{i,i+1}$ – приращение потока жидкости на выбранном интервале,
 δ – толщина пористой пленки;
 d – средний размер каналов на выбранном интервале, $d = (d_i + d_{i+1}) / 2$,
 η – вязкость жидкости (для смеси этанол-вода состава 30:70 $\eta = 2.68 \cdot 10^{-3}$ Па·с).

Результатом расчета числа сквозных каналов для всех интервалов размеров распределение пор по размерам, пример которого приведен на рис. 11.

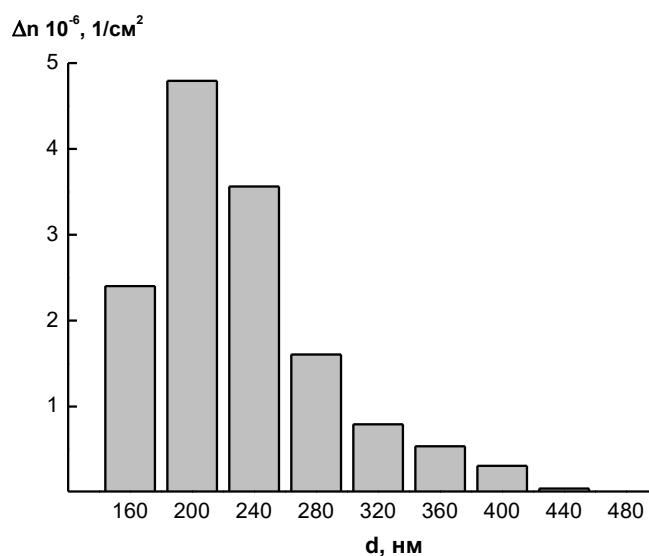


Рисунок 11 – Пример распределения пор по размерам для пористой пленки (d – диаметр пор, Δn – число сквозных пор в интервале размеров от d_i до d_{i+1})

Значение плотности пор рассчитывается по формуле:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \Delta n_i, \quad (23)$$

где n – число интервалов разбивки.

Средний размер сквозных каналов рассчитывается по формуле:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \times \Delta n_i}{\sum_{i=1}^n \Delta n_i}, \quad (24)$$

где n – количество экспериментальных величин.

Для представленного примера (рис. 11) наиболее вероятный и максимальный размер сквозных каналов составляют 200 и 440 нм соответственно. Рассчитанное число сквозных каналов (плотности пор) для данного образца имеет значение $1,4 \cdot 10^7$ пор/см². Средний диаметр пор, определенный из распределения пор по размерам, равен 230 нм.

Задание (порядок выполнения работы)

1. Рассчитать по экспериментальным данным среднее значение проницаемости пористых пленок и разброс ее значений. Найденные значения привести в л/(м² час атм).
2. Рассчитать по экспериментальным данным скорость потока жидкости и соответствующий им диаметр пор. Найденные значения скорости потока жидкости привести в м³/(м² с Па), размера пор – в нм.
3. Построить зависимость скорости потока жидкости от размера пор и для каждого интервала размеров сквозных каналов определить приращение скорости потока жидкости.
4. Рассчитать число сквозных каналов для каждого интервала и построить распределение пор по размерам.
5. Рассчитать плотность пор. Найденные значения привести в единицах пор/см².
6. Рассчитать средний размер (диаметр) сквозных пор. Найденное значение привести в нм.
7. В выводах к работе привести значения характеристик, упоминаемых в цели работы, а именно, величину проницаемости с разбросом, средний размер сквозных каналов и плотность пор.

Для выполнения расчетно-практических работ или самостоятельного изучения дисциплины предложено 2 варианта экспериментальных данных (Приложение 4).

Контрольные вопросы

1. Для чего перспективно использование (применение) пористых пленок?
2. Что такое смачиваемость (гидрофобность, гидрофильность)? Какими величинами она может быть охарактеризована количественно?
3. Какие еще существуют методы для определения размеров пор?
4. Что такое вязкость (коэффициент вязкости)?
5. Почему, когда 30%-ый водный раствор этанола протекает через все поры, его скорость потока примерно в 2,2 раза меньше, чем проницаемость для чистого этанола?

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

«ПЕРКОЛЯЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ»

Перколяция возникает в двух- или многофазных системах при приближении к некоторой критической концентрации (так называемому порогу перколяции) и характеризуется скачкообразным изменением свойств или появлением новых. Такими системами могут быть как природные, так и специально полученные материалы. Явление перколяции наблюдают, например, при протекании жидкости через пористые материалы, изменении электропроводности в системах, содержащих проводящие и непроводящие элементы, и в различных теоретических моделях, описывающих появление связанности структур (отдельных элементов). В связи с тем, что для придания новых свойств вторичным материалам широкое распространение получило создание композиционных систем, анализ перколяционных переходов играет важную роль при разработке новых материалов и прогнозирование их функциональных свойств. В данной работе рассмотрено формирование сквозных каналов в пленках из гибкоцепных кристаллизующихся полимеров, которое происходит по механизму перколяции.

Целью работы является определение параметры эмпирического уравнения, описывающего зависимость проницаемости пленок от величины их общей пористости.

Объекты исследования

Пористые пленки, описание которых приводится в ЛПР № 1.

Методы исследования

Измерение толщины пленок проводят с помощью цифрового микрометра "Vogel 0-50x0.001" (Германия).

Общую пористость пленок определяют гравиметрическим методом (см. ЛПР № 2).

Определение производительности (проницаемости) пористых пленок для этанола проводят с помощью фильтрационной ячейки (см. ЛПР № 2).

По теории перколяции взаимосвязь между характеристиками пористой структуры может быть описана следующим уравнением:

$$G \cdot \delta = K \cdot (P - P^*)^t, \quad (25)$$

где G – проницаемость образца для этанола,

δ – толщина образца,

P – общая пористость образца,

P^* – пороговое значение общей пористости,

$(P - P^*)$ – степень удаленности от порога перколяции,

t – показатель степени, характеризующий упорядоченность возникающих сквозных каналов. Если формирование сквозных каналов в объеме образца происходит случайным образом, то по теории перколяции величина $t = 1,5$.

K – размерный коэффициент.

Задание (порядок выполнения работы)

1. Построить зависимость $(G \cdot \delta)^{2/3}$ от величины общей пористости P . При построении использовать следующие величины единиц измерения: л/(м²·час·атм) для G , мкм для δ и % для P .
2. Определить пороговое значение общей пористости P^* по пересечению построенной зависимости с осью абсцисс в точке, соответствующей появлению проницаемости ($G = 0$ л/(м²·час·атм)).
3. Рассчитать размерный коэффициент K , используя уравнение $G \cdot \delta = K \cdot (P - P^*)^t$ и экспериментальные значения G , δ и P для последнего образца (образца с максимальной проницаемостью). Величина t по исходным данным имеет значение 1,5.
4. Сделать вывод об установлении взаимосвязь между проницаемостью, толщиной и общей пористостью пленок. Привести уравнение с найденными численными значениями, описывающим эту взаимосвязь. Сделать заключение о соответствии экспериментальных данных теории перколяции. Сделать вывод о том, как изменяется проницаемость пористых пленок со степенью удаленности от порога перколяции.

Для выполнения расчетно-практических работ или самостоятельного изучения дисциплины предложено 3 варианта экспериментальных данных (Приложение 5).

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры композиционных систем, в которых экспериментально можно наблюдать явление перколяции.
2. Какие факторы (в различных системах) влияют на величину порога перколяции?
3. Варьирование каких условий получения пористых пленок влияет на их толщину, общую пористость и проницаемость?

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6 **«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТЫХ СИСТЕМ** **МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСОРБЦИИ АЗОТА»**

При вторичной переработке материалов и получении композиционных систем часто используют измельченные частицы. Их важными характеристиками являются размер (распределение по размерам) и величина удельной поверхности. При использовании пористых материалов для процессов сорбции и фильтрации указанные характеристики также играют важную роль. В связи с этим определение величины удельной поверхности и размеров пор является актуальной задачей с точки зрения контроля качества сырья и готовой продукции.

Цель работы – установить влияние условий формирования пористой структуры в пленках из гибкоцепных полимеров на число и приведенный (эффективный) размер пор.

Объекты исследования

Пористые пленки, описание которых приводится в ЛПР № 1. При получении пористых пленок варьировали степень вытяжки (ε_1) при их растяжении при комнатной температуре и степень вытяжки (ε_2) при растяжении пленок на следующей стадии при повышенной температуре. Величину суммарной степени вытяжки рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 . \quad (26)$$

Методы исследования

Общую пористость пленок определяют гравиметрическим методом (см. ЛПР № 2).

Удельную поверхность пористых образцов измеряют с помощью Анализатора “Сорбтометр-М” (Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск) (рис. 12). Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации указанного Анализатора. Принцип работы прибора основан на применении метода тепловой десорбции газа-адсорбата (азота) с поверхности исследуемого материала и получении изотермы адсорбции. Азот является наиболее широко используемым газом, используемым в сорбционных методах анализа. Через адсорбер с расположенным в нем образцом пропускают стационарный поток газовой гелий-азотной смеси с заданным составом. Перед началом измерений проводится дегазация образца (навеска

составляет около 100 мг), заключающаяся в его прогреве в стационарном потоке газа в течение 30 мин при 40°C.



Рисунок 12 – Анализатор удельной поверхности «Сорбтометр М»

В ходе эксперимента с использованием Анализатора выполняются следующие операции:

- пошаговое установление состава газовой смеси;
- адсорбция газа-адсорбата на поверхности образца из потока газовой смеси данного состава при температуре жидкого азота (-196°C). Адсорбция проводится до установления равновесия между содержанием азота в газовой и адсорбционной фазах;
- десорбция газа-адсорбата с поверхности образца в поток газовой смеси при нагревании образца до температуры полной десорбции азота (0°C).

В ходе циклов адсорбции-десорбции объемная доля газа-адсорбата в газовой смеси изменяется, что регистрируется с помощью детектора теплопроводности. По результатам измерений объема десорбированного газа, произведенных при пяти составах газовой смеси, анализатор производит расчет удельной поверхности образца по стандартной методике Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ).

Результаты измерений удельной поверхности Анализатор «Сорбтометр М» представляет в виде зависимости количества адсорбированного азота от его концентрации в газовом потоке, показанном на рисунке 13. Угол наклона прямой дает величину удельной поверхности.

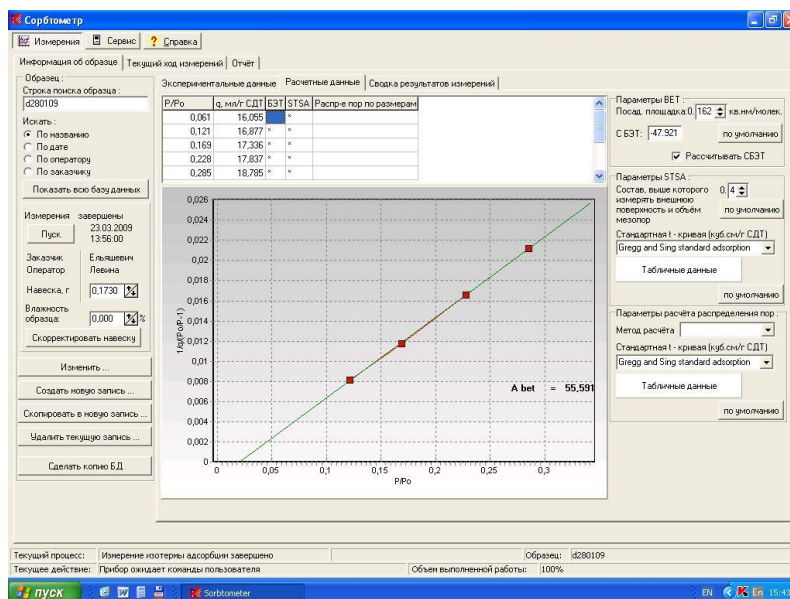


Рисунок 13 – Окно программы Анализатора "Сорбтометр-М"

Принимая допущение, что пористая структура образцов сформирована одинаковыми сферическими порами, удельную поверхность и удельный объем пор можно рассчитать по формулам:

$$S_{уд} = n 4 \pi R^2, \quad (27)$$

$$V_{уд} = n 4/3 \pi R^3, \quad (28)$$

где R – эффективный (приведенный) радиус пор,

n – число пор в единице массы образца,

$V_{уд}$ – удельный объем пор, который также можно определить из соотношения плотностей пористого (ρ_p) и плотного образца (ρ).

$$V_{уд} = 1/\rho_p - 1/\rho. \quad (29)$$

Принимая во внимание формулы 27 и 28, эффективный (приведенный) диаметр пор рассчитывается из следующего соотношения:

$$d = 6 \cdot V_{уд} / S_{уд}. \quad (30)$$

Число пор определяем по формуле:

$$n = S_{уд} / \pi d^2. \quad (31)$$

Задание (порядок выполнения работы)

1. Рассчитать плотность пористых пленок и удельный объем пор для образцов, полученных при различных степенях суммарной вытяжки. Найденные значения привести в г/см^3 для плотности и в $\text{см}^3/\text{г}$ для удельного объема пор в соответствующем столбце таблицы 2.

Таблица 2 – Определение характеристик пористых пленок, полученных при различных суммарных степенях вытяжки (ε_Σ)

ε_Σ	Плотность пористой пленки, г/см^3	Удельный объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Эффективный диаметр пор, нм	Число пор, пор/г
1,5				
...				

2. Рассчитать эффективный диаметр пор. Найденные значения привести в нм в соответствующем столбце таблицы 3.

3. Рассчитать число пор. Найденные значения привести в пор/г в соответствующем столбце таблицы 3.

4. Построить зависимость эффективного диаметра пор от суммарной степени вытяжки (начало координат в точке $\varepsilon_\Sigma = 1$, $d = 0$ нм).

5. Построить зависимость числа пор от суммарной степени вытяжки (начало координат в точке $\varepsilon_\Sigma = 1$, $d = 0$ нм).

6. Написать вывод о том, как изменяется число и размер пор в процессе растяжения пленок. Сделать заключение происходит ли слияние пор между собой с образованием более крупных.

Для выполнения расчетно-практических работ или самостоятельного изучения дисциплины предложено 3 варианта экспериментальных данных (Приложение 6).

Контрольные вопросы

1. Как и во сколько раз изменится удельная поверхность частиц кубической формы при уменьшении их размера в 2 раза?

2. Почему минимальное значение суммарной степени вытяжки ε_Σ составляет 1?

3. Почему жидкий азот считается безопасным хладагентом?

4. Как называются емкости для хранения и транспортировки жидкого азота? Какие особенности у их конструкции?

5. Как применяют жидкий азот при вторичной переработке материалов?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Образец оформления титульного листа отчета по лабораторно-практической работе

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИТМО»**

Дисциплина: «Вторичная переработка материалов»

Отчет по лабораторно-практической работе № 1
на тему «Технология получения пористых пленок»

Выполнил:
студент группы Клин 3.1
В.А. Мясников

Проверил:
доцент, к.ф.-м.н.
И.С. Курындин

ИТМО

Санкт-Петербург
2025

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Экспериментальные данные по определению плотности гранул и пленок из полиэтилена (вариант 1)

Таблица 3 – Экспериментальные данные по определению плотности ПЭ гранул

№ опыта	Масса навески гранул, г	V _н , мл	V _к , мл
1	21,896	20	43
2	17,118	22	40
3	23,749	20	45
4	18,961	21	41
5	18,031	23	42

Таблица 4 – Экспериментальные данные по определению плотности экструдированных ПЭ пленок

№ опыта	Масса образца, г	Длина, см	Ширина, см	Толщина, мкм
1	0,0898	9	5	21
2	0,0984	9	5	23
3	0,0939	9	5	22
4	0,0854	9	5	20
5	0,1028	9	5	24

Таблица 5 – Экспериментальные данные по определению плотности пористых ПЭ пленок

№ опыта	Масса образца, г	Длина, см	Ширина, см	Толщина, мкм
1	0,0406	9	5	16
2	0,0445	9	5	17
3	0,0424	9	5	16
4	0,0386	9	5	15
5	0,0465	9	5	18

Экспериментальные данные по определению плотности гранул и пленок из полипропилена (вариант 2)

Таблица 6 – Экспериментальные данные по определению плотности ПП гранул

№ опыта	Масса навески гранул, г	V _н , мл	V _к , мл
1	20,746	19	42
2	16,218	21	39
3	22,501	19	44
4	17,959	20	40
5	17,081	22	41

Таблица 7 – Экспериментальные данные по определению плотности экструдированных ПП пленок

№ опыта	Масса образца, г	Длина, см	Ширина, см	Толщина, мкм
1	0,0932	9	5	23
2	0,1054	9	5	26
3	0,1010	9	5	25
4	0,0890	9	5	22
5	0,0974	9	5	24

Таблица 8 – Экспериментальные данные по определению плотности пористых ПП пленок

№ опыта	Масса образца, г	Длина, см	Ширина, см	Толщина, мкм
1	0,0407	9	5	17
2	0,0461	9	5	19
3	0,0441	9	5	19
4	0,0389	9	5	16
5	0,0426	9	5	18

Экспериментальные данные по определению плотности гранул и пленок из поливинилиденфторида (вариант 3)

Таблица 9 – Экспериментальные данные по определению плотности гранул ПВДФ

№ опыта	Масса навески гранул, г	V _н , мл	V _к , мл
1	41,009	21	44
2	32,058	23	41
3	44,500	21	46
4	35,540	22	42
5	33,782	24	43

Таблица 10 – Экспериментальные данные по определению плотности экструдированных пленок ПВДФ

№ опыта	Масса образца, г	Длина, см	Ширина, см	Толщина, мкм
1	0,2003	9	5	25
2	0,2324	9	5	29
3	0,2159	9	5	27
4	0,2001	9	5	25
5	0,2086	9	5	26

Таблица 11 – Экспериментальные данные по определению плотности пористых пленок ПВДФ

№ опыта	Масса образца, г	Длина, см	Ширина, см	Толщина, мкм
1	0,1039	9	5	19
2	0,1205	9	5	22
3	0,1119	9	5	20
4	0,1038	9	5	21
5	0,1082	9	5	19

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Экспериментальные данные механических испытаний пленок полиэтилена (вариант 1)

Толщина ПЭ пленок составляла 20 мкм.

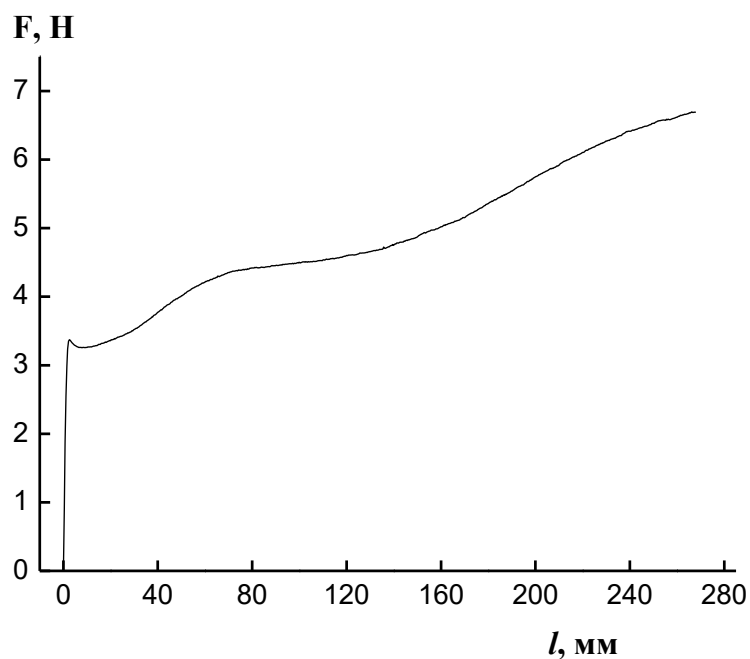


Рисунок 14 – Кривая усилие–перемещение для ПЭ пленки

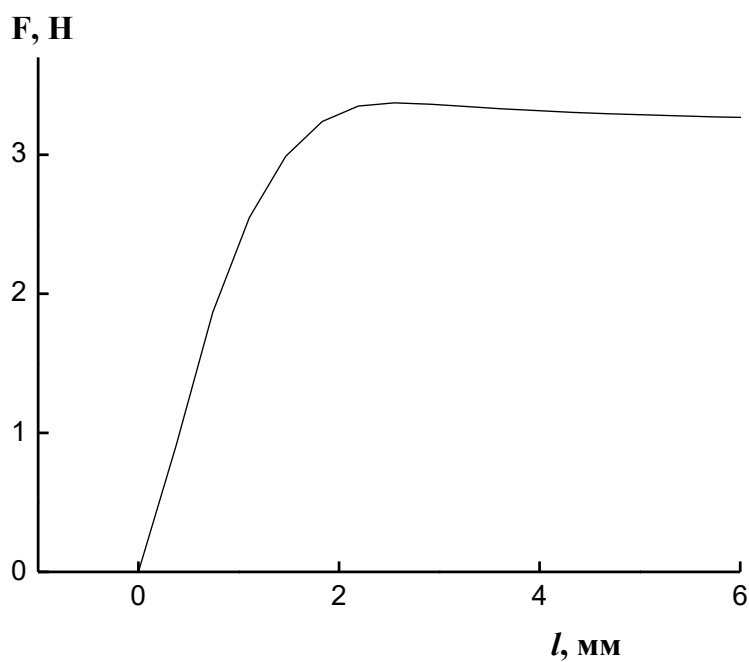


Рисунок 15 – Начальный участок кривой усилие–перемещение для ПЭ
пленки

Экспериментальные данные механических испытаний пленок полипропилена (вариант 2)

Толщина ПП пленок составляла 40 мкм.

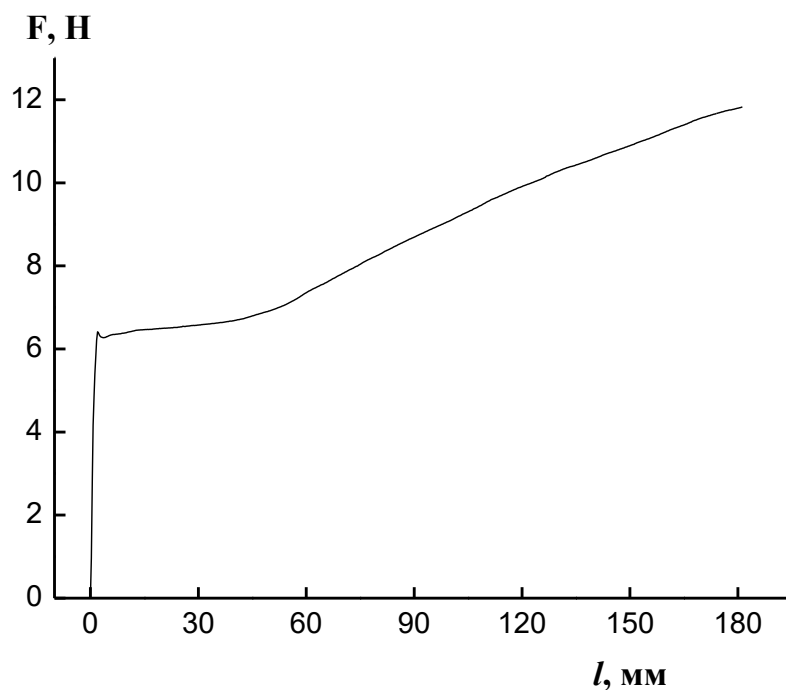


Рисунок 16 – Кривая усилие–перемещение для ПП пленки

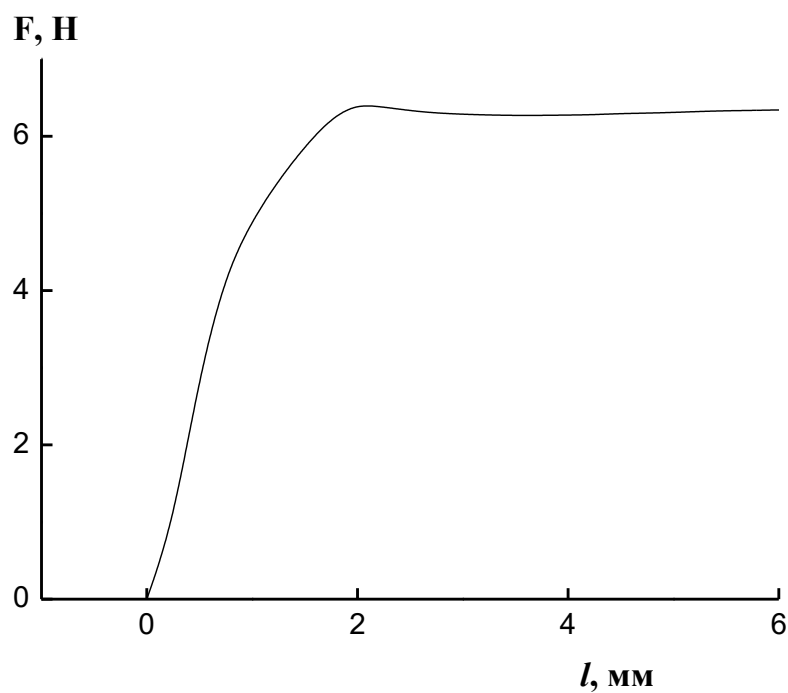


Рисунок 17 – Начальный участок кривой усилие–перемещение для ПП пленки

Экспериментальные данные механических испытаний пленок поливинилиденфторида (вариант 3)

Толщина пленок ПВДФ составляла 80 мкм.

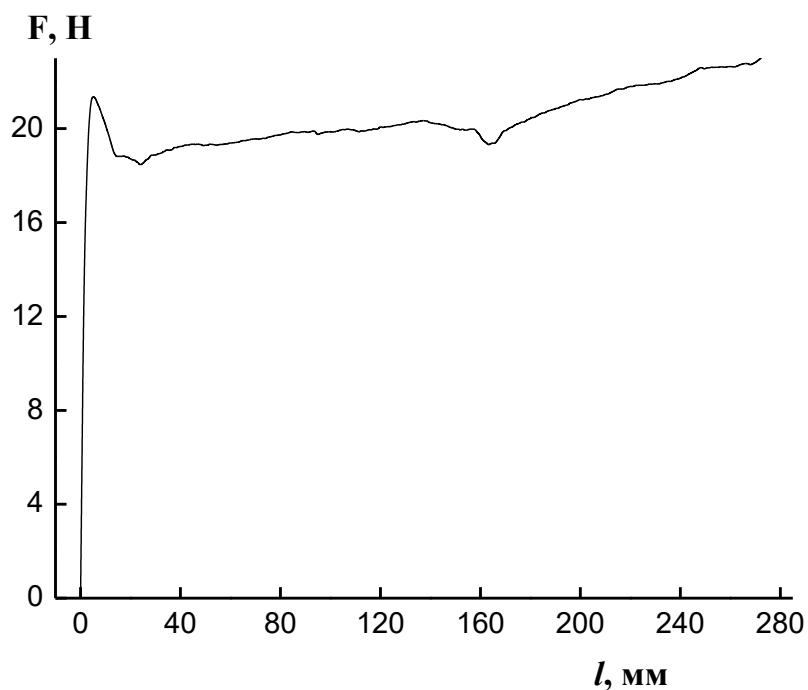


Рисунок 18 – Кривая усилие–перемещение для пленки ПВДФ

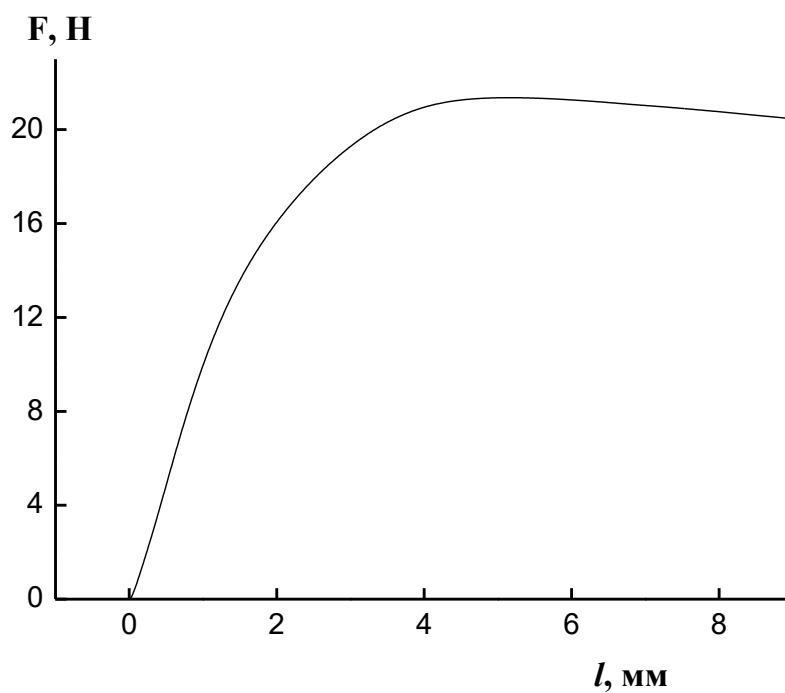


Рисунок 19 – Начальный участок кривой усилие–перемещение для пленки
ПВДФ

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Экспериментальные данные по скоростям протекания жидкостей через пористые пленки полиэтилена (вариант 1)

Толщина пористой ПЭ пленки составляла 17 мкм.

Таблица 11 – Время протекания 1 мл этанола через образец пористой ПЭ пленки

№ опыта	Время, минуты и секунды
1	1'16"
2	1'25"
3	1'12"
4	1'21"
5	1'31"

Таблица 12 – Время протекания 1 мл смеси этанол-вода через пористую ПЭ пленку при различных давлениях

Давление, атм	Время, минуты и секунды
3,0	Не протекает
3,5	48' 15"
4	12' 47"
4,5	5' 57"
5	3' 38"
5,5	2' 46"
6	2' 23"
6,5	2' 7"
7	1' 56"
7,5	1' 47"
8	1' 40"
8,5	1' 34"
9	1' 29"

Экспериментальные данные по скоростям протекания жидкостей через пористые пленки полипропилена (вариант 2)

Толщина пористой ПП пленки составляла 18 мкм.

Таблица 13 – Время протекания 1 мл этанола через образец пористой ПП пленки

№ опыта	Время, минуты и секунды
1	1'52"
2	1'40"
3	1'32"
4	1'45"
5	1'36"

Таблица 14 – Время протекания 1 мл смеси этанол-вода через пористую ПП пленку при различных давлениях

Давление, атм	Время, минуты и секунды
3,5	Не протекает
4	119' 23"
4,5	44' 11"
5	21' 41"
5,5	13' 30"
6	9' 1"
6,5	6' 17"
7	4' 37"
7,5	3' 32"
8	2' 29"
8,5	1' 55"
9	1' 43"
9,5	1' 35"

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Экспериментальные данные для серии пористых пленок полиэтилена (вариант 1)

Таблица 15 – Величина проницаемости для пористых ПЭ пленок с различной толщиной и общей пористостью

Проницаемость, л/(м ² ·час·атм)	Толщина, мкм	Общая пористость, %
1	25	24
15	22	28
41	20	32
78	18	36
131	16	40
206	14	44
313	12	48
426	11	52
569	10	56
750	9	60

Экспериментальные данные для серии пористых пленок полипропилена (вариант 2)

Таблица 16 – Величина проницаемости для пористых ПП пленок с различной толщиной и общей пористостью

Проницаемость, л/(м ² ·час·атм)	Толщина, мкм	Общая пористость, %
1	25	24
18	22	28
47	20	32
91	18	36
153	16	40
241	14	44
337	13	48
455	12	52
603	11	56
788	10	60

**Экспериментальные данные для серии пористых пленок
поливинилиденфторида
(вариант 3)**

Таблица 17 – Величина проницаемости для пористых пленок ПВДФ с различной толщиной и общей пористостью

Проницаемость, л/(м ² ·час·атм)	Толщина, мкм	Общая пористость, %
0,04	25	24
0,13	22	25
0,26	20	26
0,44	18	27
0,70	16	28
1,05	14	29
1,42	13	30
1,89	12	31
2,45	11	32
3,16	10	33

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Экспериментальные данные для серии пористых пленок полиэтилена (вариант 1)

Таблица 18 – Характеристики пористых ПЭ пленок с различной суммарной степенью вытяжки (ϵ_{Σ})

ϵ_{Σ}	Общая пористость, %	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$
1,5	23	22
2,0	32,5	32
2,5	37	37
3,0	41	43
5,0	50,5	57
5,5	52	60
11,0	58	71

Экспериментальные данные для серии пористых пленок полипропилена (вариант 2)

Таблица 19 – Характеристики пористых ПП пленок с различной суммарной степенью вытяжки (ϵ_{Σ})

ϵ_{Σ}	Общая пористость, %	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$
1,5	20	30
2,0	35	55
2,5	44	72
3,0	48	80
4,0	54	95
5,0	57	103
6,0	60	114

**Экспериментальные данные для серии пористых пленок
поливинилиденфторида
(вариант 3)**

Таблица 20 – Характеристик пористых пленок ПВДФ с различной суммарной степенью вытяжки (ϵ_{Σ})

ϵ_{Σ}	Общая пористость, %	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$
1,50	15	13
1,95	25	22
2,10	27	24
2,25	29	26
2,40	31	28
2,65	32	29
2,80	33	30

Курындин Иван Сергеевич
Подшивалов Александр Валерьевич

**Руководство к практическим и лабораторным
работам по технологии получения пористых пленок и
определению их характеристик**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А